

Квантовые объекты нанотехнологий: свойства, применения, перспективы

© Е.В. Смирнов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Россия

В статье дано подробное описание основных квантовых объектов нанотехнологий: квантовых точек, углеродных нанотрубок и графена. Изучение квантовых явлений, определяющих уникальные свойства этих объектов, приобретение навыков их исследования и использования в практических целях составляет основную задачу подготовки студентов технических университетов к работе в наиболее перспективных направлениях современной науки и техники. В статье описаны методы получения квантовых точек, их физические свойства, а также свойства углеродных нанотрубок и графена. Значительное внимание уделено анализу уже существующего практического применения квантовых объектов нанотехнологий и обсуждению его широких перспектив. Отмечается, что необходимым условием успешного освоения нанотехнологий в нашей стране является изучение студентами квантовых явлений в курсе физики технических учебных заведений.

Ключевые слова: *объекты нанотехнологии, квантовые точки, углеродные нанотрубки, графен.*

Введение. Современное состояние науки и техники достигло такого уровня, который позволяет оперировать (манипулировать) отдельными молекулами, отдельными атомами и даже отдельными электронами. Именно они составляют элементную базу нанотехнологий — новых разделов высоких технологий, в которых изучаются и используются в практических целях процессы, происходящие в областях нанометровых размеров. Цель нанотехнологий состоит в управлении поведением отдельных наночастиц — атомов, молекул, молекулярных систем — при создании новых наноструктур, наноустройств и материалов со специальными физическими, химическими и биологическими свойствами. Эти объекты обладают очень интересными физическими особенностями, связанными, в первую очередь, с проявлением квантовых эффектов, и имеют очень широкие перспективы применения в радиоэлектронике, лазерной технике, информационных технологиях, машиностроении, биологии, медицине и т. д.

Расширяющееся с каждым годом практическое использование наноструктур составляет суть происходящей в настоящее время нанотехнологической революции (см., например, [1–6]). По мнению специалистов, эта революция охватит все жизненно важные направления деятель-

ности человека, а ее последствия будут существенно более обширными и глубокими, чем последствия компьютерной революции конца XX в.

По мере развития нанотехнологий предметом исследований в этой области становятся все более новые и перспективные объекты, проявляющие уникальные физические свойства: квантовые ямы, квантовые нити, квантовые точки, графен, силицен и т. д. Свойства этих объектов обусловлены их квантовомеханической природой и описываются законами квантовой физики. Именно поэтому студентам технических вузов важно хорошо знать данные законы и уметь пользоваться ими в своей практической работе. Необходимость рассмотрения вопросов, связанных с квантовой физикой, в современном курсе общей физики технического университета обусловлена как интенсивным развитием и практическим применением нанотехнологий, так и тем, что квантовая физика — основной аппарат инженерных расчетов в этой области.

Квантовые точки. Квантовой точкой называется нанокристалл, в котором движение электронов ограничено в трех пространственных направлениях. Размер области, ограничивающей движение электронов в этих структурах, составляет, как правило, от нескольких нанометров до нескольких десятков нанометров. Такие объекты, подобно атомам, обладают дискретным энергетическим спектром, поэтому их часто называют «искусственными атомами», хотя они и состоят из тысяч реальных атомов.

Квантовые точки, как и ряд других наноструктур, получают, используя чаще всего полупроводниковые материалы. Они представляют собой выращенные специальным образом nanoостровки — включения одного полупроводника (с меньшей шириной запрещенной зоны) в матрице или на поверхности другого полупроводника (с большей шириной запрещенной зоны). Различие в ширине запрещенных зон полупроводников приводит к тому, что электроны оказываются локализованными в пределах квантовой точки. Таким образом, квантовая точка представляет собой своеобразную ловушку, удерживающую электроны внутри себя. Квантовые точки могут иметь форму пирамид, сфер, сплюснутых капель и т. д., которая зависит от технологических условий их получения.

Одной из наиболее распространенных технологий получения полупроводниковых квантовых точек является молекулярно-лучевая эпитаксия. Согласно этой технологии выращивание квантовых точек проводится в высоковакуумной установке путем осаждения атомов или молекул одного вещества на поверхности другого (подложке). При этом поток осаждаемого вещества из источника может быть настолько малым, что оказывается возможным наносить на подложку один мономолекулярный слой за другим.

В качестве примера на рис. 1 приведены квантовые точки PbSe, выращенные с помощью этого метода на подложке PbTe. При росте первого мономолекулярного слоя PbSe на подложке PbTe, из-за различия постоянных решетки этих кристаллов, в растущем слое возникают упругие напряжения. При дальнейшем осаждении молекул PbSe эти напряжения увеличиваются, так что энергетически выгодным становится не равномерный рост осаждаемого вещества по всей поверхности подложки, а образование отдельных nanoостровков PbSe на поверхности PbTe. Вновь поступающие из источника молекулы PbSe осаждаются на данных островках, образуя в итоге кристаллические структуры — квантовые точки — в виде пирамидок (см. рис. 1). Аналогичным образом, в виде пирамидок, осуществляется рост квантовых точек InAs/GaAs, Ge/Si и др. Более детальный вид квантовой точки Ge/Si, полученный с атомным разрешением с помощью электронного сканирующего микроскопа, приведен на рис. 2.

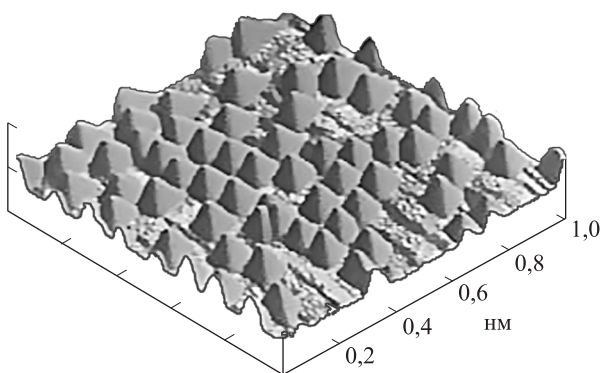


Рис. 1. Квантовые точки PbSe на подложке PbTe [7]

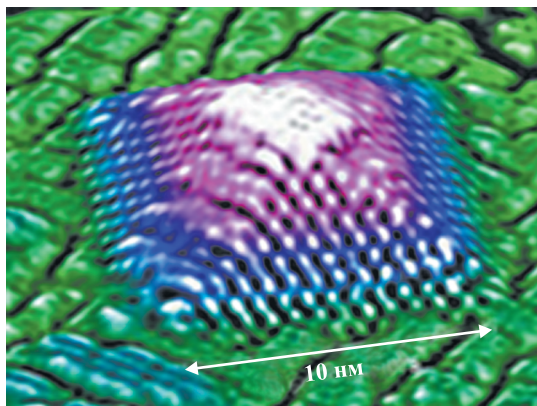


Рис. 2. Германиевая квантовая точка на кремниевой подложке [8]

Квантовую точку можно рассматривать как «искусственный атом», лишенный ядра. Какой именно натуральный атом представлен искусственным, определяется числом избыточных электронов, заключенных в квантовой точке. Причем, это число электронов можно менять, изменяя условия роста квантовых точек, или же с помощью внешних электромагнитных полей. Таким образом, можно «искусственный атом» свинца или ртути превратить в «искусственный атом» серебра или золота.

Современные методы исследования позволяют получать информацию о плотности вероятности нахождения электрона в квантовой точке, т. е. дают возможность визуализировать волновые функции электрона в нанокристаллических объектах. На рис. 3 приведено распределение плотности вероятности нахождения электрона в квантовой точке для основного и первого возбужденного состояний, полученное российскими учеными методом магнитотуннельной микроскопии [9]. Объектом их исследований были квантовые точки InAs, помещенные в двухбарьерную гетероструктуру AlGaAs/GaAs. Характерный размер квантовых точек составлял ~ 20 нм, их высота $\sim 2 \dots 3$ нм, плотность квантовых точек на поверхности подложки $\sim 0,5 \cdot 10^{11}$ см $^{-2}$. Следует подчеркнуть, что экспериментально измеренная в данной работе плотность вероятности качественно согласуется с результатами расчетов, выполняемых для потенциальной ямы конечной глубины в курсе общей физики.

Спектр излучения квантовых точек, как уже отмечалось, является дискретным, точнее, квазидискретным. Это связано с тем, что даже в условиях одного опыта не удается вырастить совершенно одинаковые квантовые точки. Они различаются как размерами, так и числом содержащихся в них атомов. Природные атомы одного сорта, как известно, абсолютно тождественны и имеют одинаковый спектр излучения. «Искусственные атомы» — нанокристаллы — подобной тождествен-

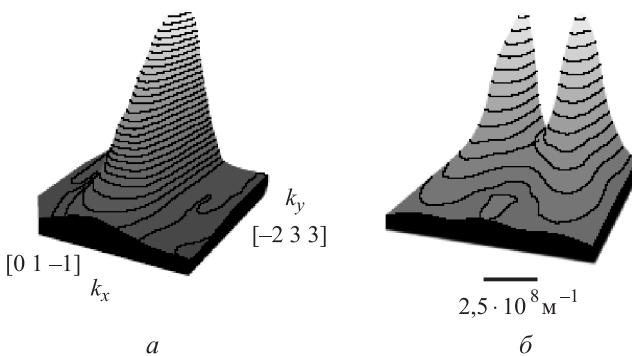


Рис. 3. Экспериментально измеренная плотность вероятности пребывания электрона в квантовой точке в основном (а) и первом возбужденном (б) состояниях [9]

ностью не обладают. Минимальный разброс размеров квантовых точек, достигнутый к настоящему времени, наблюдается у рассмотренных выше квантовых точек PbSe/PbTe и составляет примерно 2%.

Разброс в размерах приводит к различию в энергетических спектрах отдельных квантовых точек. Таким образом, результирующий спектр излучения системы квантовых точек представляет собой сумму линий излучения отдельных квантовых точек и имеет определенную ширину. Энергетическая ширина такого спектра, согласно экспериментальным данным, составляет несколько десятков миллиэлектрон-вольт ($\Delta\lambda \sim 5$ нм) при положении максимума линии излучения в ближнем инфракрасном или видимом диапазоне.

Еще одним важным методом получения квантовых точек, представляющим интерес как с научной, так и с прикладной точек зрения, является коллоидный синтез, который в настоящее время является важной областью неорганического синтеза наночастиц. Получение квантовых точек методом коллоидного синтеза осуществляется в жидкой фазе. Управляя параметрами технологического процесса выращивания зародышей нанокристаллов, можно менять условия роста и получать нанокристаллы различных размеров и формы.

Подбор технологических параметров роста позволяет добиваться формирования нанокристаллов в тех или иных направлениях и в итоге получать нанокристаллы самой различной формы, в том числе в виде разнообразных многогранников. На заключительном этапе синтеза квантовых точек их покрывают полупроводниковым материалом с большей шириной запрещенной зоны, чем основной полупроводник (рис. 4). Эти точки покрывают также амфифильным полимером, который содержит одновременно водоотталкивающие (гидрофобные) и водопритягивающие (гидрофильные) компоненты. Квантовые точки с амфифильным покрытием могут растворяться в воде, связываться с молекулами, полимерами и образовывать комбинации с другими квантовыми точками.

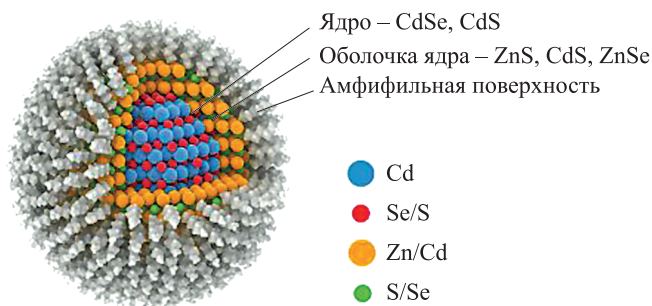


Рис. 4. Коллоидная квантовая точка [10]

Важным достоинством этого метода является то, что он позволяет производить квантовые точки практически в любых необходимых для практических потребностей количествах. Возможность гибкого управления технологией производственного процесса приводит к тому, что удается получать квантовые точки с небольшим разбросом размеров, а следовательно, и параметров точек, и широким спектром поглощения.

С амфифильной поверхностью коллоидной квантовой точки могут прочно связываться другие молекулы, что делает такие квантовые точки чувствительными по отношению к определенным веществам, молекулам, и, в частности, к опухолевым клеткам. Следует отметить, что использование квантовых точек позволяет получить один из самых ранних способов диагностики онкологических заболеваний. Важно также то, что амфифильное покрытие никак не сказывается на излучательных свойствах квантовых точек.

В качестве материалов для создания квантовых точек, как уже отмечено, используются PbSe, PbTe, InAs, GaAs, Ge, Si, CdSe, ZnSe, CdS, ZnS, а также ряд других материалов. Выбирая различные соединения и меняя условия технологических процессов роста квантовых точек, можно получать широкий спектр нанообъектов, отличающихся не только размерами, но и физико-химическими свойствами.

Следует подчеркнуть, что стремительное проникновение квантовых точек в самые разные области науки и техники обусловлено, в первую очередь, их уникальными оптическими характеристиками [11]:

- узким симметричным пиком флуоресценции, положение которого зависит от размера квантовой точки и ее химического состава;
- широкой полосой возбуждения, позволяющей возбуждать различающиеся по своим размерам и свойствам квантовые точки одним источником излучения;
- высокой яркостью флуоресценции квантовых точек;
- уникально высокой фотостабильностью, что дает возможность использовать мощные источники возбуждения.

Квантовые точки являются настолько универсальными объектами, что их практическое применение имеет широкие перспективы почти во всех областях современных высоких технологий. На основе квантовых точек создаются новые виды полупроводниковых лазеров, в частности, оказывается возможным создание сверхмалых лазеров, способных оперировать отдельные живые клетки. В 2010 г. японские исследователи представили первый в мире лазер на квантовых точках, позволяющий передавать данные со скоростью 25 Гбит/с на одной моде, что дает возможность передавать за более короткие промежутки времени большее количество информации.

Совсем недавно компании LG и Samsung сообщили о создании первых дисплеев на квантовых точках. Ожидается, что такие дисплеи ока-

жуются не только ярче и энергетически эффективнее современных, но и будут иметь более низкую стоимость.

Очень перспективно применение квантовых точек в интроскопии биологических структур и организмов. Так, квантовые точки, введенные в кровеносные сосуды, позволяют с высоким разрешением рассматривать мельчайшие капилляры. Кроме того, они дают возможность получать трехмерные изображения живых клеток, например, раковых или клеток мозга, и, как уже отмечалось, очень перспективны при ранней диагностике и лечении на самых ранних стадиях онкологических заболеваний.

Важно отметить, что квантовые точки являются одним из главных кандидатов для представления основы квантовой памяти — кубитов — при вычислениях на квантовом компьютере.

Углеродные нанотрубки. Обнаружение новых форм существования углерода — одного из самых распространенных элементов на Земле, таких как фуллерены, углеродные нанотрубки, графен, относится к числу наиболее удивительных и важных открытий в науке XX столетия. Долгое время считалось, что углерод имеет только две кристаллические структуры — графит и алмаз. Впоследствии было показано, что атомы углерода могут составлять сложные молекулы с поверхностями, образованными правильными пяти-, шести-, семи- и восьмиугольниками. В конце XX в. были открыты разнообразные формы элементарного углерода, среди которых следует выделить фуллерены, нанотрубки и графен. В данной публикации основное внимание уделено анализу свойств углеродных нанотрубок и графена и описанию их возможных применений в нанотехнологиях.

Нанотрубка представляет собой цилиндрическую поверхность, образованную правильными шестиугольниками из атомов углерода (рис. 5). Протяженность этих трубок, при диаметре от долей нанометра до нескольких нанометров, может достигать нескольких сантиметров. В зависимости от условий получения они могут иметь открытые или закрытые концы. Кроме того, в зависимости от размера и структуры, нанотрубки могут обладать проводящими свойствами либо проводников, либо полупроводников [12].

Углеродная нанотрубка характеризуется целыми числами (индексами симметрии) n и m , которые называются также индексами хиральности. В общем случае нанотрубки обладают винтовой осью симметрии, при этом углеродные шестиугольники закручиваются по спирали вокруг оси трубки (см. рис. 5, б).

Анализ показывает, что два типа трубок — с индексами $(n, 0)$ и (n, n) — не имеют винтовой симметрии. В трубках с индексами $(n, 0)$ стороны углеродных шестиугольников при движении по трубке парал-

лельно оси цилиндра образуют зигзаги. Такие трубки называются зигзажными (рис. 6, *a*). В трубках с индексами (n, n) стороны шестиугольников при движении параллельно оси цилиндра образуют креслоподобные провалы. Такие трубки называются кресельными (рис. 6, *б*). В общем случае, как отмечалось, трубки обладают винтовой осью симметрии (рис. 6, *в*).

Индексы симметрии углеродных нанотроек содержат очень важную информацию об их свойствах. Прежде всего, они позволяют однозначно определить диаметр нанотрубки d :

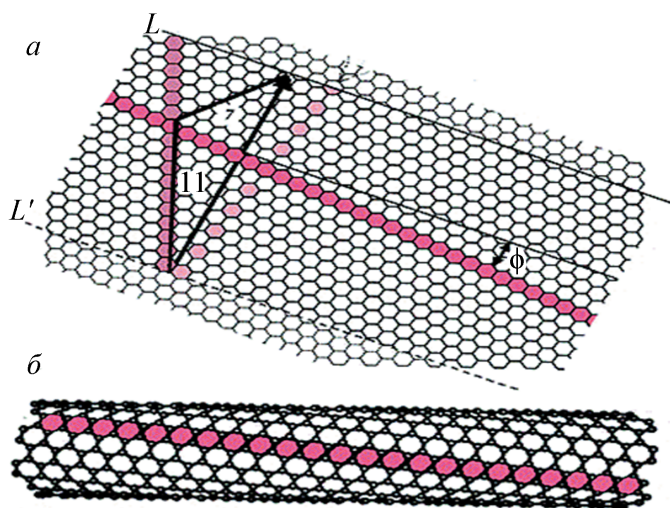


Рис. 5. Модель углеродной нанотрубки: *a* — графитовая лента, образованная правильными шестиугольниками; *б* — свернутая из этой ленты нанотрубка [12]

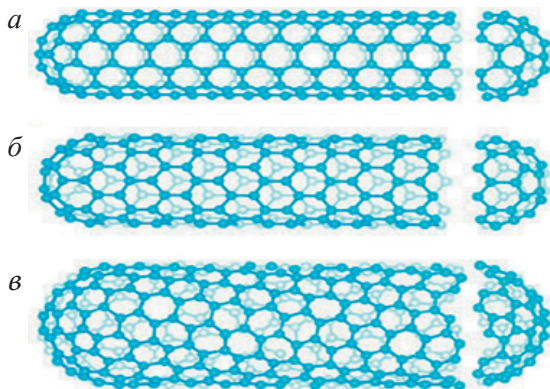


Рис. 6. Типы структуры углеродных нанотроек: *a* — зигзажная; *б* — кресельная; *в* — с винтовой симметрией [12]

$$d = \sqrt{n^2 + m^2 + nm} \frac{\sqrt{3} d_0}{\pi},$$

где $d_0 = 0,142$ нм — наименьшее расстояние между атомами углерода в графитовой плоскости.

Кроме того, индексы n и m , как показывают результаты теоретического рассмотрения, содержат информацию об электропроводности углеродных нанотрубок. Так, нанотрубки с кресельной структурой обладают металлическим типом проводимости, что подтверждается и экспериментальными данными. Нанотрубки с зигзажной структурой при n , кратном 3, обладают металлической проводимостью, а в остальных случаях имеют полупроводниковый тип проводимости с шириной запрещенной зоны от нескольких десятых до примерно двух электронвольт.

Нанотрубки с винтовой осью симметрии, в зависимости от значения индексов n и m , могут проявлять как металлический, так и полупроводниковый тип проводимости. Металлическая проводимость реализуется для тех трубок, у которых

$$n - m = 3k,$$

где k — целое число. Во всех остальных случаях такие нанотрубки обладают полупроводниковыми свойствами с шириной запрещенной зоны ΔE_g , обратно пропорциональной ее диаметру d .

Каждый атом углерода в нанотрубке связан с тремя ближайшими соседями. Следовательно, из четырех валентных электронов атома углерода три образуют локализованные σ -связи, а четвертый участвует в образовании делокализованной π -связи. Именно эти π -электроны, слабее всего связанные со своими атомами, участвуют в переносе заряда в нанотрубке.

Заметное влияние на проводимость нанотрубки оказывают волновые свойства электронов. При движении электрона в нанотрубке оказываются возможными (разрешенными) только такие состояния, для которых дебройлевская длина волны электрона укладывается целое число раз на длине окружности трубки. Это заметно ограничивает число состояний, в которых проводимость осуществляется вокруг цилиндра. Основным направлением, в котором происходит перенос заряда, является направление вдоль трубки.

Проводимость нанотрубок, обладающих металлическим типом проводимости, может быть очень большой. Согласно оценкам, углеродные нанотрубки могут пропускать ток плотностью 10^9 А/см², тогда как мед-

ный провод из-за джоулева нагрева плавится уже при плотности тока 10^6 А/см². Существенным фактором, обеспечивающим высокую проводимость углеродных нанотрубок, является очень малое количество структурных дефектов, на которых рассеиваются электроны. Именно поэтому сопротивление нанотрубки очень невелико и большой по величине ток не нагревает ее так сильно, как он нагревает металлический проводник. К тому же, углеродные нанотрубки обладают достаточно высокой теплопроводностью.

Эффективным методом изучения структуры и электронных свойств углеродных нанотрубок является сканирующая туннельная микроскопия (СТМ) (рис. 7). Она позволяет исследовать не только атомную структуру трубки, но и определять тип проводимости, а также параметры симметрии нанотрубки.

Углеродные нанотрубки обладают также уникальными механическими свойствами, что является следствием особенностей их атомной структуры. Они характеризуются большой упругостью при изгибе и высокой прочностью. Под действием приложенной силы нанотрубка изгибается и затем, после снятия нагрузки, восстанавливает свое состояние. Причиной того, что большинство материалов при изгибе деформируются и ломаются, является наличие дефектов: дислокаций, границ зерен и т. д. Поскольку, как уже отмечалось, углеродные нанотрубки обладают совершенной структурой с малым количеством дефектов, их упругость оказывается очень высокой.

Еще одной причиной, повышающей упругость и прочность нанотрубок, является наличие углеродных колец в их стенках. Эти углеродные кольца в виде правильных шестиугольников сами имеют очень

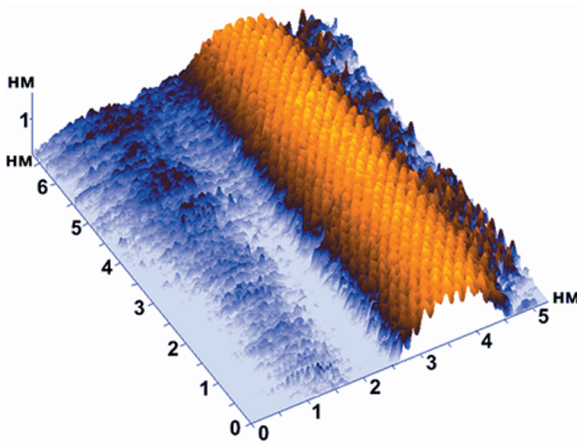


Рис. 7. Результаты СТМ-исследования углеродной нанотрубки [13]

высокую прочность. При изгибе они могут менять свою форму, деформируются, но не рвутся.

Нанотрубки, получаемые в процессе роста, могут быть как однослойными, так и многослойными, т. е. представлять собой систему вложенных друг в друга цилиндров уменьшающегося радиуса, подобно тому, как вкладываются одна в другую матрешки. Исследования показали, что группы концентрических (телескопических) нанотрубок, находящиеся внутри другого набора таких же трубок, могут скользить друг относительно друга с частотой порядка миллиарда раз в секунду. Такие механические гигагерцовые осцилляторы могут стать основой наноразмерных приборов, компоненты которых будут обладать молниеносной быстротой реакции на магнитные и механические воздействия.

Необычные и чрезвычайно разнообразные свойства углеродных нанотрубок — структурные, электрические, механические и т. д. — содержат в себе очень широкие возможности их практического применения. Рассмотрим некоторые из них.

Хорошая проводимость нанотрубок в сочетании с миниатюрными размерами и высоким значением отношения длины к диаметру ($>10^3$) делает их уникальным источником автоэлектронной (холодной, полевой) эмиссии. Использование эмиттеров холодных катодов на основе нанотрубок позволяет заметно улучшить рабочие характеристики плоских мониторов, катодолюминисцентных источников света, рентгеновских трубок и ряда других приборов. Нанотрубки, обладающие металлическим типом проводимости, могут быть также использованы для создания материалов, экранирующих электромагнитное поле.

Структурные и электронные свойства нанотрубок обеспечивают широкие возможности их использования в электронике. На их основе уже созданы выпрямители, транзисторы, осцилляторы нанометровых размеров, быстродействие которых на порядки превосходит быстродействие существующих устройств. С помощью углеродных нанотрубок, уже зарекомендовавших себя как универсальный «стройматериал» нанoeлектроники, в ближайшее время возможно осуществить революционный переход от кремниевой микроэлектроники к углеродной нанoeлектронике. Так, например, транзисторы, построенные из нанотрубок, будут в 500 раз меньше тех полупроводниковых транзисторов, которые используются в современных микросхемах. Плотность записи информации в нанoeлектронике будет больше, чем в кремниевой микроэлектронике, примерно на три порядка.

С помощью углеродных нанотрубок могут быть созданы сверхконденсаторы, обладающие очень большой емкостью. Для этого суспензию из нанотрубок наносят на металлическую подложку так, чтобы нанотрубки располагались близко друг к другу. Известно, что емкость конденсатора пропорциональна площади обкладок, на которых накаплива-

ется электрический заряд. Благодаря своему малому размеру нанотрубки обладают большой суммарной площадью поверхности, что позволит запастись в сверхконденсаторах энергию до 30 кВт на один килограмм массы по сравнению с 4 кВт/кг, характерными для современных конденсаторов. Сверхконденсаторы на основе нанотрубок могут быть использованы в транспортных средствах, работающих на электричестве, а также в электронике при необходимости получения мощных и коротких импульсов энергии.

Уникальные перспективы имеют углеродные нанотрубки в медицине, в частности при создании мозговых имплантантов. Исследователям удалось вырастить культуру нервных клеток головного мозга человека на субстрате из сети углеродных нанотрубок и установить, что нанотрубки, благодаря своим проводящим свойствам, улучшают передачу нервных импульсов между клетками. Полученные результаты могут быть использованы при создании долговременных имплантантов головного мозга, а также в информационных нейросетевых технологиях и при создании искусственного интеллекта.

Механические и геометрические свойства углеродных нанотрубок позволяют использовать их в качестве острия иглы сканирующих зондовых микроскопов. Нанотрубные острия этих микроскопов, как показали эксперименты, имеют заметные преимущества по сравнению с традиционно используемыми иглами. Опыты также показали, что углеродные нанотрубки могут успешно использоваться и в качестве зондов-световодов для ближнепольной оптической микроскопии.

Углеродные нанотрубки, как и фуллереновые структуры, являются полыми внутри и могут служить идеальными контейнерами (капсулами) для молекул других веществ. Капсулы из нанотрубок обладают важным свойством защищать капсулированный материал от воздействия со стороны окружающей среды и имеют большие перспективы в различных областях, в частности, в экологии. Особенно интересным представляется нанокапсулирование радиоактивных и магнитных материалов.

Благодаря уникальной прочности и упругости углеродные нанотрубки могут быть использованы в качестве армирующих волокон для получения сверхпрочных композитных соединений. Интересно, что правительство США приняло программу по созданию спутникового «поводка» — прочной нити на основе углеродных нанотрубок, которая протянется от центра управления космическими полетами на Земле до космического аппарата, находящегося на околоземной орбите. Основная идея такого космического кабеля, выдвинутая еще К.Э. Циолковским и Ф.А. Цандером, заключается в заброске грузов на искусственный спутник Земли, находящийся на геостационарной орбите, за счет центробежной силы.

Графен. Графен является первым истинно двумерным кристаллом, он состоит из одиночного слоя атомов углерода, собранных в

гексагональную решетку (рис. 8). Интерес к графену появился после открытия углеродных нанотрубок, представляющих собой свертку графенового листа в цилиндр. Поэтому теория графена в приложении к нанотрубкам была достаточно хорошо проработана еще до его обнаружения.

Графен, полученный впервые в 2004 г. [14], обладает высокой механической прочностью (в 200 раз больше, чем у стали), значительной теплопроводностью и очень высокой подвижностью носителей заряда электронов — максимально возможной среди всех проводящих материалов. Все это определяет большой интерес к нему, как к очень перспективному материалу для использования в самых разнообразных приложениях.

Существует много различных методов получения графена: механический, осуществляемый с помощью расщепления высокоориентированного пиролитического графита, химический, метод радиочастотного плазмохимического осаждения из газовой фазы, рост при высоком давлении и температуре, а также ряд других.

Идеальная структура графена содержит в своем составе только правильные шестиугольники. Включение в эту структуру пяти- или семиугольников приводит к появлению дефектов и искривлению атомной плоскости графена — образованию седловидных искривлений атомной плоскости, сворачиванию ее в конус, формированию замкнутых структур — фуллеренов и т. д.

Потенциальное поле применения графена необычайно широко: использование в композитных материалах с целью создания более легких самолетов и спутников, замена кремния в транзисторах, внедрение в пластмассу для придания ей электропроводности, создание более устойчивых к механическим воздействиям медицинских имплантатов и еще многое, многое другое. Некоторые возможности уже реализуются: так, в частности, в лаборатории Калифорнийского университета был создан графеновый полевой транзистор, работающий на частоте 300 ГГц.

Заключение. Активно ведущиеся во всем мире в настоящее время исследования в области нанотехнологий, стремление поставить ее на службу человечеству отражают важную особенность современного этапа научно-технического развития. Кроме того, нанотехнологии находят самое широкое применение и в технических направлениях, связанных с обороной страны. «...Тот, кто раньше овладеет

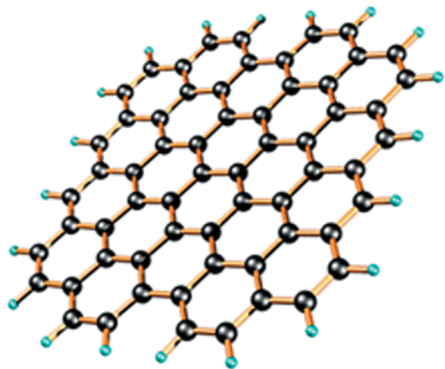


Рис. 8. Двумерный кристалл графена [14]

нанотехнологией, займет ведущее место в техносфере будущего». Эти слова принадлежат Э. Теллеру, отцу американской водородной бомбы, лауреату премий им. А. Эйнштейна и им. Э. Ферми.

Выпускникам технических университетов при работе в современных условиях, вне всякого сомнения, придется активно использовать достижения нанотехнологий. Поэтому основы их знаний в этой области должны быть заложены во время учебы в вузе. Это означает, что большое внимание при подготовке будущих специалистов должно уделяться современной физике и, в первую очередь, квантовой физике как физической основе нанотехнологий.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Головин Ю.И. Нанотехнологическая революция стартовала! *Природа*, 2004, № 1, с. 1–16.
- [2] Пул Ч.-мл., Оуэнс Ф. *Нанотехнологии*. Москва, Техносфера, 2006, 336 с.
- [3] Кобаяси Н. *Введение в нанотехнологию*. Москва, БИНОМ, Лаборатория знаний, 2005, 134 с.
- [4] Роко М.К., Уильямс Р.С., Аливисатос П. *Нанотехнология в ближайшем десятилетии*. Москва, Мир, 2002, 292 с.
- [5] Третьяков Ю.Д. *Нанотехнологии. Азбука для всех*. Москва, Физматлит, 2008, 368 с.
- [6] Алферов Ж.И., Асеев А.Л., Гапонов С.В. Наноматериалы и нанотехнологии. *Микросистемная техника*, 2003, № 8, с. 3–13.
- [7] Alchalabi K., Zimin D., Kistorz G., Zogg H. Self-assembled semiconductor quantum dots with nearly uniform sizes. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, vol. 90, pp. 26–104.
- [8] Курс лекций. Наноматериалы и нанотехнологии. rudos.exdat.com/docs/index-60424.html
- [9] Вдовин Е.Е., Ханин Ю.Н., Дубровский Ю.В. Визуализация волновых функций электронов в InAs самоорганизующихся квантовых точках с помощью магнитотуннельной спектроскопии. *Успехи физических наук*, 2001, т. 171, № 12, с. 1365–1367.
- [10] Гусев А.И. *Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии*. Москва, Физматлит, 2007, 416 с.
- [11] Олейников В.А., Суханова А.В., Набиев И.Р. Флуоресцентные полупроводниковые нанокристаллы в биологии и медицине. *Российские нанотехнологии*, 2007, № 2, с. 160–173.
- [12] Дьячков П.Н. *Электронные свойства и применение нанотрубок*. Москва, Бином. Лаборатория знаний, 2011, 488 с.
- [13] Строганов А.А. Атомарная структура поверхности и сенсорные свойства углеродных нанотрубок. Автореф. дис. ... канд. техн. наук, 2007, 24 с.
- [14] K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, I.V. Grigorieva, A.A. Firsov. *Science*, 2004, vol. 306, no. 5696, pp. 666–669.

Статья поступила в редакцию 16.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Смирнов Е.В. Квантовые объекты нанотехнологий: свойства, применения, перспективы. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 6. URL: <http://engjournal.ru/catalog/nano/hidden/795.html>

Смирнов Евгений Васильевич родился в 1948 г., окончил в МФТИ в 1972 г. Канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 80 печатных работ. Области научных интересов: когерентное взаимодействие излучения с веществом, мессбауэровская дифракция, квантовая физика, нанотехнологии. e-mail: seva09@rambler.ru